

5.Приказ Министра экологии и природных ресурсов Украины от 27 мая 2002 г. №198 «О признании приказов Минэкобезопасности Украины от 18.07.1996 г. №75 и от 18.07.1996г. №76 недействительными». – К.: Минэкоресурсов Украины, 2002. – 2 с.

6.Приказ Минэкобезопасности Украины от 18.07.96 г. №75 «Об утверждении Порядка разработки и утверждения нормативов предельно допустимых выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух стационарными источниками». – К.: Минэкобезопасности Украины, 1996. –13 с.

7.Приказ Минэкобезопасности Украины от 18.07.96 г. №76 «Об утверждении Инструкции по оформлению и содержанию проекта нормативов предельно допустимых выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух от стационарных источников». – К.: Минэкобезопасности Украины, 1996. – 19 с.

8.Постановление Кабинета Министров Украины от 28 декабря 2001 г. №1780 «Об утверждении Порядка разработки и утверждения нормативов предельно допустимых выбросов загрязняющих веществ от стационарных источников». – К., 2001. – 2 с.

9.ДБН А.2.2-1-95. Состав и содержание материалов оценки воздействий на окружающую среду (ОВОС) при проектировании и строительстве предприятий, зданий и сооружений. Основные положения проектирования. – К.: Госкомградостроительства Украины, 1996. – 14 с.

Получено 24.02.2004

УДК 697 + 699.82

В.А.МАЛЯРЕНКО, д-р техн. наук

*Харьковская национальная академия городского хозяйства*

Ю.И.ЧАЙКА, канд. техн. наук

*Харьковский государственный технический университет строительства и архитектуры*

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕМПЕРАТУРНОГО СОСТОЯНИЯ ТЕПЛЫХ ПОЛОВ С ЛИНЕЙНЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ТЕПЛОТЫ**

Определены функции распределения температуры поверхности отопительных панелей водяных систем лучистого отопления в зависимости от температуры теплоносителя, температуры воздуха в помещении, шага и глубины заложения трубопроводов в бетон. На основании изложенных зависимостей разработаны рекомендации к проектированию греющих панелей с уменьшенной толщиной.

Одним из важнейших направлений градостроительства является создание энергоэффективных «интеллектуальных зданий», в которых более эффективно происходит использование как энергетических, так и материальных ресурсов [1].

Совершенствование инженерных систем современных энергоэффективных зданий требует совершенствования методик их расчета и проектирования, что в свою очередь требует изменения нормативных документов регламентирующих эти методы расчета. При этом расчетные методики должны основываться на учете возможно большего количества факторов, влияющих на эксплуатационные качества, так как

пренебрежение этими факторами приводит к ошибкам при проектировании, нарушению нормального функционирования систем, снижению их срока службы.

При проектировании систем водяного отопления современных зданий, в том числе и энергоэффективных, просматривается тенденция к переходу на пониженный температурный график, что позволяет создавать более комфортные параметры микроклимата, более рационально использовать тепловую энергию, снижать потери теплоты при ее транспортировке.

Однако при работе на пониженном температурном графике необходимо использовать отопительные приборы с развитой площадью поверхности. Примером таких приборов являются отопительные панели систем лучистого отопления, сочетающие в себе высокие теплотехнические и санитарно-гигиенические качества [2].

Данные системы отопления применяются как при реконструкции существующих систем, так и при строительстве новых зданий.

Существуют определенные технологии выполнения греющих панелей теплых полов [3]. Согласно технологии их изготовления минимальная толщина греющей плиты теплого пола должна составлять 94 мм. Данная толщина обусловлена применением:

утеплителя для междуэтажного утепления или перекрытия над подвалом (минимум 20 мм);

металлопластиковых трубопроводов наружным диаметром  $D_{нх\delta}$  14х2, 16х2, 18х2, 20х2,5;

слоя бетона толщиной не менее 50 мм для равномерного распределения температур по толщине греющей панели;

покрытия, как правило, керамической плитки или природного камня.

Применение более тонких греющих плит желательно, поскольку уменьшение толщины бетонной плиты приводит к увеличению габаритов помещения, снижению нагрузки на перекрытие и опорные элементы здания. Однако, в тонких плитах происходит неравномерное распределение температур. Поскольку коэффициенты температурного расширения бетона, труб, покрытия пола различны, происходит образование трещин и отслоение покрытия пола от плиты.

Нестационарные температурные воздействия, работа при высоких температурных режимах вызывают в бетоне переменные по величине напряжения, которые разрушают его структуру, приводя к появлению микротрещин по контактными поверхностям заполнителя и цемента, а также в теле цементного камня и покрытия плиты. Это снижает проч-

ность и модуль упругости бетона, а также увеличивает деформации ползучести и усадки.

Поверхностные слои бетона нагреваются медленнее, а охлаждаются быстрее, чем внутренние, прилегающие к трубам. Поэтому, при нагреве и охлаждении панели бетон испытывает различные температурные напряжения ввиду неодинаковой температуры по сечению панели.

Напряжения, вызываемые температурными воздействиями отопительной системы, накладываются на поле напряжений от внешних сил, увеличивая трещинообразование и деформативность.

Поскольку пластиковые или металлопластиковые трубы практически не обладают адгезией к бетону, сила их сцепления с бетоном зависит только от трения и зацепления. А от качества сцепления зависит расстояние между трещинами и ширина их раскрытия. При многократно повторяющихся циклах нагревания-остывания греющей бетонной плиты сцепление труб с бетоном еще более уменьшается.

Вместе с этим в бетоне происходят пластические деформации, связанные с изменением его тепловлажностного состояния, изменяется структура бетона. При дальнейшей эксплуатации число и размеры трещин увеличиваются [4].

Наибольшая разность температур теплоносителя и бетонной конструкции плавающей панели наблюдается при пуске (разогреве) системы отопления, переходе на более интенсивный режим работы.

Для определения усилий от температурных воздействий необходимо знать характер распределения температур в конструкции. Точный расчет температурного поля панели с трубчатым нагревателем довольно сложен, так как в массиве панели образуется трехмерное температурное поле. В практических целях возможно упростить задачу, приняв линейное распределение температуры вдоль греющего элемента. Кроме этого, нестационарная теплопроводность наблюдается при разогреве или остывании греющей плиты, т.е. при изменении температурного режима помещения. Поэтому для решения данной задачи необходимо рассматривать двухмерное нестационарное температурное поле, описываемое уравнением Лапласа

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{c \cdot \rho} \left( \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} \right), \quad (1)$$

совместно с граничными условиями третьего рода на лицевой поверхности панели

$$\beta[t_{\text{пов}} - t_{\text{в}}] - \lambda \left( \frac{\partial t}{\partial y} \right) = 0. \quad (2)$$

Поскольку при устройстве плит теплого пола обязательно применение высокоэффективных утеплителей, принимаем, что тепловой поток через тыльную сторону панели равен нулю.

Задача решалась методом конечных элементов при помощи стандартного программного обеспечения. Были рассчитаны температурные поля в массиве плиты и на ее поверхности при изменяющейся средней температуре теплоносителя –  $t_{\text{ср}}$ , температуре воздуха в помещении –  $t_{\text{в}}$ , глубине –  $h$  и шаге  $S$  заложения трубопроводов в бетон. Теплопроводность бетона при этом принималась постоянной, равной  $\lambda = 1,163 \text{ Вт/м } ^\circ\text{C}$ .

При помощи методов планирования эксперимента были получены зависимости для определения температуры на поверхности бетонной плиты над греющей трубой –  $t_s$  и на расстоянии от трубы, равном  $S/2 - t_{s/2}$ , при средней температуре теплоносителя  $t_{\text{ср}} = 45^\circ\text{C}$  и температуре воздуха в помещении, лежащей в диапазоне от 15 до 24  $^\circ\text{C}$  (таблица).

Зависимости для определения температуры  $t_s$  и  $t_{s/2}$

Средняя температура теплоносителя $t_{\text{ср}}, ^\circ\text{C}$	Температура воздуха в помещении $t_{\text{в}}, ^\circ\text{C}$	Температура поверхности плиты над греющей трубой в зависимости от шага заложения $t_s, ^\circ\text{C}$	Температура поверхности плиты на расстоянии $S/2$ от греющей трубы $t_{s/2}, ^\circ\text{C}$
45	24	$t_s = 43,117e^{-2,2576h}$	$t_{s/2} = 76,234e^{-0,7806s} - 43,117e^{-2,2576h}$
45	22	$t_s = 42,813e^{-2,5907h}$	$t_{s/2} = 75,006e^{-0,8901s} - 42,813e^{-2,5907h}$
45	20	$t_s = 42,593e^{-2,8905h}$	$t_{s/2} = 73,424e^{-0,9987s} - 42,593e^{-2,8905h}$
45	18	$t_s = 42,346e^{-3,2202h}$	$t_{s/2} = 72,004e^{-1,1137s} - 42,346e^{-3,2202h}$
45	15	$t_s = 42,026e^{-3,717h}$	$t_{s/2} = 69,246e^{-1,2805s} - 42,026e^{-3,717h}$

В результате неравномерного распределения температур по сечению панели температурные деформации сопровождаются развитием внутренних напряжений, что приводит к трещинообразованию.

Напряженно-деформированное состояние нагревательной панели характеризуют ряд факторов:

напряжения и деформации, возникающие из-за неравномерности распределения температур по телу панели;

напряжения и деформации, возникающие из-за разности температур между трубой и бетоном и несоответствия коэффициентов линейного расширения и теплофизических характеристик труб и бетона;

напряжения и деформации, возникающие из-за разности коэффициентов линейного расширения и теплофизических характеристик покрытия пола и бетона греющей плиты.

Напряжения и деформации, возникающие из-за разности температур между трубой и бетоном подразделяются на осевые, радиальные и тангенциальные. Они наиболее велики на начальной стадии разогрева бетонной панели. Современные технологии изготовления панелей (армирование, ограничение длины прямолинейных участков, медленный разогрев в течении нескольких суток) уменьшают влияние данных напряжений на общее напряженно-деформированное состояние панели. В то же время следует отметить, что с увеличением шага между трубопроводами величина данных деформаций снижается [5].

При неравномерном распределении температуры по поверхности бетонной греющей плиты из-за разности коэффициентов температуропроводности и линейного расширения возникают напряжения и деформации, которые при превышении силы сцепления покрытия с плитой приводят к отслоению покрытия.

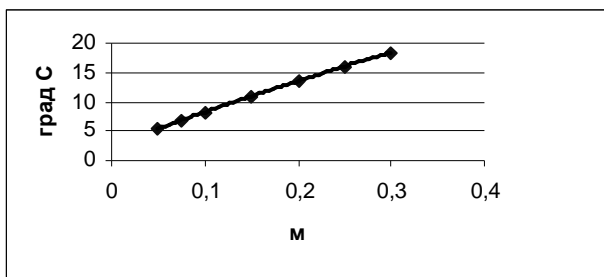
Согласно расчетам температурных полей при различных значениях варьируемых параметров –  $S$ ,  $h$ ,  $t_{\text{ср}}$ ,  $t_{\text{в}}$  показано, что при малых глубинах заложения трубопровода шаг заложения значительно влияет на неравномерность распределения температур внутри панели и на ее поверхности. На рисунке представлен график разности температур поверхности плиты над трубой и в точке, лежащей на расстоянии  $S/2$  при различном  $S$ , диаметре трубопроводов 16х2, средней температуре теплоносителя 45 °С, температуре воздуха в помещении 24 °С, глубине заложения  $h = 0,04$  м.

Поэтому при проектировании плит теплого пола необходимо пользоваться следующими правилами:

во избежание разрушения плиты от действия температурных деформаций минимальное расстояние между поверхностями трубы и плиты должно составлять не менее 30 мм;

при невозможности устройства греющей плиты толщиной более 80 мм (без учета слоя утеплителя), для минимизации температур-

ных деформаций на поверхности плиты, шаг укладки трубопроводов следует принимать минимальным;  
рекомендуется применять армирование греющей плиты;  
для обеспечения максимальной теплоотдачи греющей плиты шаг труб следует принимать минимальным, исходя только из минимального радиуса изгиба трубопроводов;  
при выходе на рабочий режим эксплуатации разогрев плиты необходимо производить с максимальным приращением температуры не более 5 °С/сут.



Разность температур на поверхности панели в зависимости от шага заложения труб

На основании проведенных многовариантных расчетов температурных полей греющих плит теплого пола получены зависимости для определения температуры поверхности бетонной плиты над греющей трубой –  $t_s$  и на расстоянии от трубы, равном  $S/2 - t_s/2$ . Адекватность математической модели подтверждена сопоставлением результатов многочисленных расчетов и натурных наблюдений за работой лучистых систем отопления.

Анализ теплового состояния «плавающих» панелей теплого пола дал возможность разработать рекомендации по усовершенствованию данных систем и конструкций. Внедрение рекомендаций позволяет увеличить эффективность работы, срок службы отопительных приборов лучистых систем отопления, повысить уровень теплового комфорта в помещениях.

1. Табунщиков Ю. А. . От энергоэффективных к жизнеудерживающим зданиям. – [http://www.abok.ru/for\\_spec/articles.php.nid=125](http://www.abok.ru/for_spec/articles.php.nid=125).
2. Богословский В.Н. и др. Отопление. – М.: Стройиздат, 1991. – 735 с.
3. Справочник проектировщика системы KAN-therm.–В.: KAN, 2000. – 122 с.
4. Милованов А.Ф. Жаростойкий железобетон. – М.: Госстройиздат, 1963. – 345 с.
5. Строгин Н.С. Панельные перекрытия с потолочно-напольным отоплением. – М.: Стройиздат, 1975. – 112 с.

УДК 69.059.25

Н.Д.АНДРИЙЧУК, канд. техн. наук

*Восточноукраинский национальный университет им.Владимира Даля, г.Луганск***ОБ УЧЕТЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОДСИСТЕМ ТЕПЛОГЕНЕРИРУЮЩИХ УСТАНОВОК**

Рассматривается концепция динамической декомпозиции теплогенерирующих установок, предложен обобщенный показатель и показана методика его использования для упрощения математической модели системы регулирования температуры теплоносителя.

Математические модели процессов, протекающих в теплогенерирующих установках (ТГУ), представляют собой достаточно сложную систему нелинейных дифференциальных уравнений [1], включающую математическую модель объекта регулирования (чаще всего систему нелинейных дифференциальных уравнений или уравнений в частных производных); математическую модель регулятора, включающего датчик регулируемой величины, преобразователь, собственно регулятор; модели исполнительного механизма и регулирующего органа, линий связи.

Исследование динамики процессов регулирования, оптимизацию настроек параметров регулятора целесообразно проводить на упрощенной модели, если такая возможность имеется. При оценке возможности упрощения математической модели во внимание должны приниматься погрешности идентификации параметров передаточных функций, входного сигнала, частотных характеристик и т.д. Упрощение математических моделей отдельных звеньев можно выполнить с помощью методов теории чувствительности [2].

Динамические свойства элементов теплогенерирующей установки (постоянные времени, времена транспортного запаздывания, частотные характеристики и т.п.) могут существенно отличаться. В связи с этим появляется возможность декомпозиции ТГУ на отдельные подсистемы, каждая из которых объединяет элементы, близкие по динамическим свойствам.

Динамическая декомпозиция основывается на концепции так называемого модельного подхода. Если  $\Delta u = \Delta u(t)$  и динамические характеристики двух подсистем теплогенерирующей установки существенно различны, то переходные процессы в них можно подразделить на быстрые и длительные. Очевидно, что в этом случае достижение нового стационарного состояния всей системой определяется длитель-